

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03917

研究課題名(和文) 超流動乱流における量子渦の可視化と普遍的エネルギースペクトルの解明

研究課題名(英文) Visualization of quantum vortex structures and the energy spectrum in super fluid turbulence

研究代表者

辻 義之 (TSUJI, Yoshiyuki)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：00252255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：超流動乱流中の微細粒子を可視化するため、撮影カメラの光学系の改良をおこなった。その結果、3時刻以上の粒子を検出できる割合が向上し、粒子径分布の計算が文献値として既知の分布と一致するようになった。実験体系および解析プログラムの改良により、超流動乱流場の微細粒子のラグランジュ軌道の撮影をおこなった。粒子軌道に沿った速度構造関数を計算することで、そのべき指数を算出することができた。このべき指数は、ラグランジュスペクトルのべき指数と等価である。粒子径によりこのべき指数は異なることが明らかとなった。また、粒子速度と加速度の確率密度関数から、常流動成分と超流動成分の割合が大きく影響することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The visualization system was improved and the small particle motions in the superfluid could be visualized. The particle sizes are order of 1 micro meter. The boundary between particle and background was clearly distinguished and then the Lagrange trajectory of small particle was identified by image processing system. Based on these improvements of experimental procedure, the Lagrange particle trajectories are visualized and their statistical statistics are analyzed. The power-law exponent of velocity structure functions, which is equivalent to Lagrange spectral exponent, was derived. It was found that there are two different slope regions. The small scale is affected by the quantum vortex and large scale shows the uniform motion. The probability density function of Lagrange velocity and acceleration indicates that they are strongly dependent on the particle sizes and the ratio of super fluid density.

研究分野：流体工学

キーワード：超流動乱流 可視化 粒子軌道

1. 研究開始当初の背景

液体ヘリウム(He)は、絶対温度 2.17K においてその粘性が消滅して安定な超流動状態に遷移する。この粘性がない状態では、通常の室内実験では実現不可能な高レイノルズ数(Re)数乱流が生成される。量子乱流のエネルギースペクトルに Kolmogorov の $-5/3$ 乗則が観測された背景には、流体乱流と共通のエネルギーカスケードの存在が示唆される。本研究では、量子乱流場の三次元速度の計測により、渦タングル構造を可視化することで、乱流統計則との関連を明らかにすることが必要とされていた。量子化された渦構造の解析から、通常の流体乱流における普遍則を要素還元的に理解する視点に興味があった。また、物性研究と流体研究との融合を促進することで、量子乱流現象を理解する新たな学問体系を創成し、室内規模の高レイノルズ数実験方法の可能性を調べる必要があった。

2. 研究の目的

申請者らは固体水素をトレーサーとして超流動中に播種することで、量子渦の可視化を試みてきた。粒子が渦にトラップされることで渦の骨格が浮き上がり、量子渦の集団(タングル)を形成する。量子渦は三次元的に移動し、接近した渦はつなぎ替えをおこないつながりながら、タングルを形成する。可視化精度の向上には、より微細な粒子が必要となる。そこで、本研究では微細粒子の生成方法の確立をおこなった。数ミクロンの粒子を鮮明に撮像できるように、レーザー光学系とカメラ撮像系、画像処理のアルゴリズムを開発した。とくに、粒子を時間経過とともに空間中で追跡するシステムを開発することをめざした。

乱流中の微小粒子の移動という観点から、粒子の Lagrange 速度、加速度の計測をおこなう。量子乱流中の微小粒子は量子渦(タングル)にトラップされ、その挙動は量子渦の振る舞いを反映している。生成した粒子は均一の粒子径を持つわけではなく、ある範囲に分布を持つため、粒子径に依存した Lagrange 統計を算出して、その差異から量子渦分布についての特徴づけをおこなうことを目的とする。

3. 研究の方法

図1に極低温収納容器であるステンレス製クライオスタット装置概略図を示す。クライオスタットは液体ヘリウム層、液体窒素層、断熱真空層よりなる三重のデュワー構造となっている。デュワー中央には透明ダクトが設置されており、下面のヒーターから熱流束を印加することで熱カウンター流を発生させる。可視化ダクトは $50 \times 55 \times 115\text{mm}$ の寸法であり、底面にシート状ヒーターが取り付けられている。ヒーター出力は約 $200\text{W}/\text{m}^2$ から $800\text{W}/\text{m}^2$ まで変化させた。ただし、解析には対向流が形成される $600\text{W}/\text{m}^2$ までのデータを用いる。クライオスタットには3方向に可視化窓が設

置されており、 0° から 180° 方向に光学系により厚さ 1mm に調整された連続レーザー光を照射し、 90° 方向よりハイスピードカメラで撮影を行う。可視化領域は $5.6\text{mm} \times 5.6\text{mm}$ 、空間分解能は $5.47\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、時間分解能は 250fps である。本研究では HeII 中に水素とヘリウムの混合ガスを噴射して水素を固化させ、微細な固体水素粒子を生成し、トレーサ粒子として流れに追従させ可視化計測を行う。噴射する混合ガス比は $\text{H}_2 : \text{He} = 1 : 40$ 、噴射圧力 20kPa で、HeI の状態で噴射を行い、微細粒子を生成する。液体ヘリウム層の温度は、真空ポンプによって減圧することで調整した。温度は 1.76K から 2.09K の範囲に設定した。

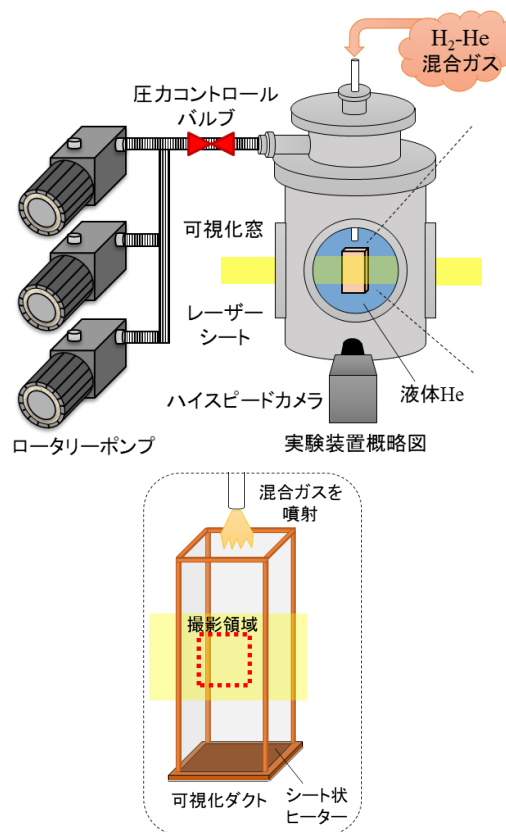


図1 クライオスタット装置、ダクト概略図

He 温度は 1.9K まで短時間で下げる必要があるため、3 台のロータリーポンプを新たに設置した。また、He 温度と水位を常時モニターすること、圧力をフィードバック制御することで、He 温度を調整した。ハイスピードカメラで撮影した画像を PTV (粒子追跡流計測法) を用いて解析をおこなう。PTV は特定の粒子を追跡するラグランジュ的統計計測法であり、本研究のようにトレーサ粒子の数が少ない場合に適している。また、PIV 解析と違い粒子一つ一つを追跡するため、粒子ごとの軌道を解析することが可能である。粒子検出の手法として、ラベリングを用いて粒子境界を検出するアルゴリズムを開発した。以下に、PTV 解析手順を以下に示す。(1) 画像のフィルター処理により、バックグラウンドを除去し、

敷居値以上の輝度値を持つトレーサ粒子を検出する。(2)検出したトレーサ粒子の輝度値より、中心座標、明度、サイズなどを求める。また、粒子サイズにより粒子を分類する。(3)複数の画像間で同一のトレーサ粒子を探索し、粒子ごとに追跡を行う。(4)追跡結果より、3枚以上連続で追跡できた画像間での移動距離から、トレーサ粒子の速度、加速度を算出する。粒子サイズ d を3条件に分類して(条件A: $21 \leq d[\mu\text{m}] \leq 34$, 条件B: $38 \leq d[\mu\text{m}] \leq 51$, 条件C: $55 \leq d[\mu\text{m}] \leq 68$)、統計量の解析をおこなった。

4. 研究成果

粒子生成に用いる気体として、窒素と水素を用いてその粒子径を比較した。 λ 点温度よりも高い場合には、粒子は長時間にわたり浮遊するが、時間とともに凝集する。 λ 点よりも低い場合には、短時間で沈降もしくは浮かび上がることが観測された。窒素と酸素では粒子径分布に大きな差異は認められなかった。

そこで、水素を用いて粒子生成をおこなうこととして、液中に噴出するノズル形状、圧力、混合比を変えながら、粒子生成の条件を調べた。ノズルは直径 5mm、可視化領域の上部から噴射圧力 20kPa で噴出する。噴射する混合ガス比は $\text{H}_2 : \text{He} = 1 : 40$ とした。微細な粒子を生成するためには、噴出圧力と可視化位置の関係を可視化領域の形状に合わせて微妙に調整が必要である。

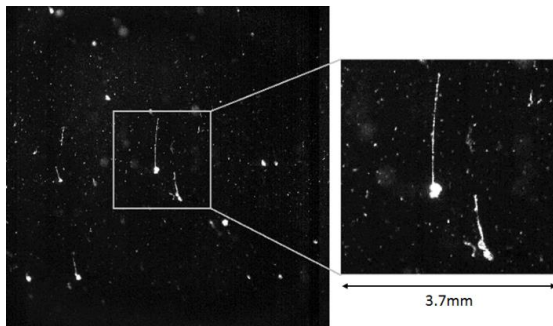


図2 量子渦の可視化画像 ($T=2.13\text{K}$)。

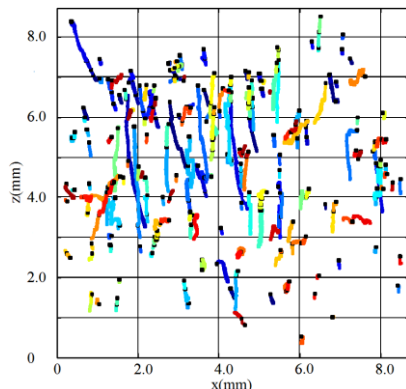


図3 粒子ごとに色分けした軌道。黒い●は、軌道の出発点をあらわす ($T=2.09$, $q=419\text{W}/\text{m}^2$)。

図2に温度 $T=2.13\text{K}$ における、HeII 相転移後の条件で撮影された画像を示す。 λ 点付近では、量子渦にトラップされた粒子を観測できるが、温度を下げると数珠状につらなった粒子は観測されなくなる。画像の垂直方向を z 軸方向、水平方向を x 軸方向とする。大きさの異なる微細水素粒子により量子渦が可視化されていることが確認できる。しかし、量子渦は可視化されたもの以外にも数多く存在しており、それらを解析するため、PTV 方を用いたトレーサ粒子の運動の解析を行う。

ヒーターを加熱することで、対交流を発生させた場合の粒子軌道の Lagrange 速度と加速度を算出した。微粒子は粘性抵抗によって常流動成分によって上向きに移動し、量子渦にトラップされて下向きに移動する。図3に温度 $T=2.09\text{K}$, $q=419\text{W}/\text{m}^2$ の熱流束を印加した条件における熱カウンター流の軌跡を示す。F40枚以上の画像で連続して追跡できたトレーサ粒子の軌跡であり、連続した粒子ごとに実線で結び、終点は塗りつぶして表示している。熱カウンター流による上下の運動が確認できた。粒子軌道を詳細に解析すると、粒子径の大きさによって、その運動に違いがみられたため、便宜的に粒子の大きさを3つのグループに分けて速度の分布関数を計算した。

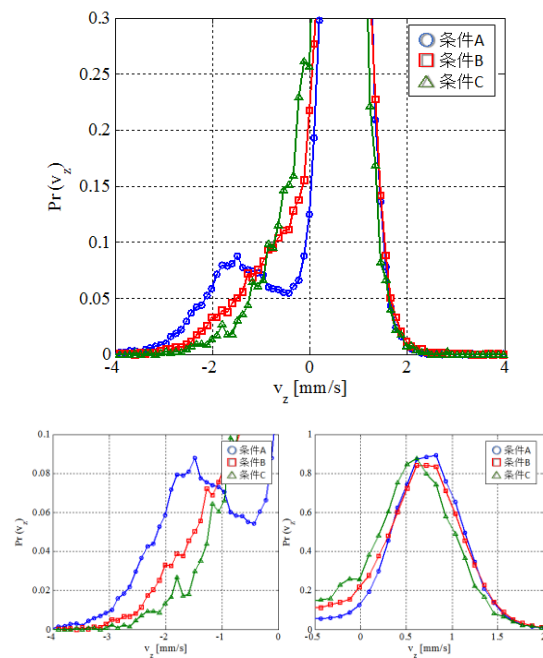


図4 粒子速度の確率密度関数 ($T=2.09$, $q=419\text{W}/\text{m}^2$)。下図左は超流動成分、右図は常流動成分の拡大図。

図4にトレーサ粒子の z 方向成分の粒子速度の確率密度関数を示す。 z 軸の正、負方向の粒子速度で、それぞれにピークを持つ分布が得られた。正負のそれぞれの分布は、正方向が常流動成分に追従、負方向が超流動成分中の量子渦にトラップされたトレーサ粒子と考えられる。分布関数の詳細を考察する

ために、粒子速度の正、負方向それぞれを拡大した確率密度分布を図4（下図）に示す。

(a)は負方向である超流動成分、(b)は正方向である常流動成分である。超流動成分中の量子渦にトラップされた粒子は粒子径によってピークの値に違いが生じ、粒子径が小さいほど量子渦の影響を強く受けている。一方で常流動成分に追従する粒子は粒子径の影響をあまり受けていない。上向き正の速度（状流動成分）は粒子径への依存性が少ないが、下向き速度（量子渦にトラップされた粒子速度）には、粒子径依存性が確認される。これは、粒子径によって渦タングルにトラップされる頻度が異なることを示唆している。

次に、トレーサ粒子の運動を正方向に移動する常流動成分と負方向に移動する超流動成分に区別し、粒子加速度の解析をおこなった。粒子加速度は小さな粒子ほど大きな加速度を示すが、標準偏差で無次元化した分布関数には、粒子径依存性がみられず類似の分布型を示した。常流動成分加速度は加速度 PDF と同じ平均値と標準偏差を持つ正規分布に近い分布を持つ。一方で、超流動成分加速度は常流動成分と比べ幅広い分布を持ち大きな加速度を持っていることが明らかになった。そのため、量子渦の影響を受けている可能性があると考えられる。また、粒子径による分布の違いは顕著には見られない。粒子加速度の大きな部分は、空間に局在しており間欠的に観測される。この大きな加速度を示す粒子は、下向きに移動する場合であり、量子タングルにトラップされた粒子であることが画像解析からもわかる。つまり、量子タングル自体は時空間的に複雑な運動をする。一方で、粘性抵抗に付随する上向き粒子の軌跡は直線的である。

粒子軌道の詳細を調べるために、ハースト指数 H を調べた。時刻 t における粒子の位置ベクトルを $\vec{x}(t)$ とすると、

$$\langle |\vec{x}(t+\tau) - \vec{x}(t)|^2 \rangle \propto \tau^{2H} \quad (1)$$

と定義される。ブラウン運動の場合には、 $H = 1/2$ であり、直線的な運動の場合には $H = 1$ となる。熱対向流下の粒子軌道を解析した結果、ある特徴的な時間スケール τ_0 が存在して、その時間スケールを境にハースト指数が変化することが分かった。時間スケールは熱対向流の強さによって異なり、対向流が強い場合ほど小さくなる。この傾向は、量子タングルの状況を反映していると考えられる。粒子軌道の軌跡から、Lagrange 速度の構造関数も計算をおこなって、解析を続けている。構造関数のフーリエ変換はスペクトルになるため、Lagrange スペクトルのべき指数指数を算出できる。

ハースト指数を算出することにより、粒子径による Lagrange 軌道依存性、即ち、どのようなスケールで量子渦が粒子に対し影響を与えているかを考察できる。各粒子径におけるハースト指数は同一ではなく、その領域は大きく2つに分けられる。ハースト指数の

小さい τ を short time, 大きい領域を long time と定義する。Short time においては粒子径が小さいほどハースト指数が小さく、粒子は複雑な挙動で運動している。また、粒子径が小さいほど short time におけるハースト指数が小さい傾向が確認された。これまでの考察から粒子径が小さいほど、量子渦の影響を受けやすいと考えられるため、short time では粒子が量子渦からの干渉を受ける時間スケールであるといえる。一方で long time においては、ハースト指数は大きく $H = 1$ に近くなる。つまり、粒子軌道は等速運動に近い。これは粒子が層流である熱カウンター流に追従しているため、大きな時間スケールで粒子軌道を見ると等速に近い運動をしていると考えられる。また、各条件の粒子軌道において short time から long time へと遷移する時間 τ_0 は粒子径が小さいほど大きくなる傾向がある。これは粒子が小さいほど、量子渦による影響を長時間受けていることを示唆している。ヒーター温度を大きくすると、常流動成分が卓越して乱流となるが、その状態ではハースト指数の変化が確認されなかった。

次に、実験で明らかになったハースト指数から、粒子軌道をシミュレーションすることで、粒子軌道の量子渦の相互作用を考察した。ハースト指数を用いたシミュレーションは 1 step ごとにハースト指数に応じた移動量を計算し、それを 2^{12} 回繰り返して、粒子の移動量を計算している。シミュレーションでは small-scale のハースト指数が $H = 0.55$, large-scale におけるハースト指数が $H = 0.90$ の条件とした。シミュレーションは二種類の異なるハースト指数の運動を足し合わせることで再現している。一つは small-scale に該当する 1 step の移動量が小さい $H = 0.5$ の運動、もう一つは large-scale に該当する 1 step の移動量が大きい $H = 0.95$ の運動である。図5に粒子軌道シミュレーションを示す。粒子軌道を巨視的に見るとほぼ直線的な運動を示している。これは熱カウンター流の流れに粒子が追従しているため、対向流を反映し直線的な軌道をしていると考えられる。粒子軌道を微視的に調べると、軌道上の随所において粒子の急な方向転換などの不規則な挙動を示している。これは量子渦から粒子が何らかの影響を受けているためであると考えられる。

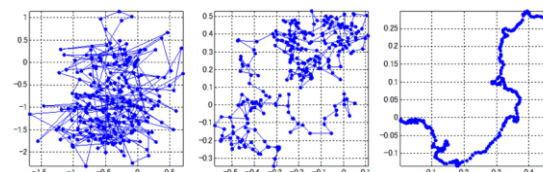


図5 ハースト指数を用いたシミュレーション結果。左から $H=0.1, H=0.5, H=0.9$ 。

微細粒子と量子渦との相互作用には、量子渦が直接に作用する特徴的な時間スケール τ_0 が存在すること、その時間スケールではハースト指数はブラウン運動に近い小さな値を示すことがわかった。一方、大きな時間スケールでは直線的な軌道をえがくことが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

[1] Noriyuki Furuichi, Yoshiya Terao, Yuki Wada, and Yoshiyuki Tsuji, "Further experiments for mean velocity profile of pipe flow at high Reynolds number", *Physics of Fluids* **30**, 055101 (2018) 査読有 <https://doi.org/10.1063/1.5017261>

[2] T. Tong, T. Tsuneyoshi, T. Ito, Y. Tsuji, Instantaneous mass transfer measurement and its relation to large-scale structures in pipe flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 71, June 2018, Pages 160–169 査読有 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.03.016>

[3] Yoshinobu Yamamoto and Yoshiyuki Tsuji, Numerical evidence of logarithmic regions in channel flow at $Re=8000$, *Phys. Rev. Fluids* **3**, 012602(R) – Published 29 January 2018 査読有 <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.012602>

[4] Wataru Kubo, Yoshiyuki Tsuji, Lagrangian Trajectory of Small Particles in Superfluid He II, *Journal of Low Temperature Physics*, June 2017, Volume 187, Issue 5–6, pp 611–617. 査読有 <https://doi.org/10.1007/s10909-017-1764-4>

[5] Yoshiyuki Tsuji, Ivan Marusic, and Arne V. Johansson, Amplitude modulation of pressure in turbulent boundary layer, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 61, Part A, (2016), Pages 2-11. 査読有 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.05.019>

[6] Noriyuki Furuichi, Yoshiya Terao, Yuki Wada, and Yoshiyuki Tsuji, Friction factor and mean velocity profile for pipe flow at high Reynolds numbers, *Physics of Fluids*, vol.27, 095108 (2015) 査読有 <https://doi.org/10.1063/1.4930987>

[学会発表] (計 19 件)

[1] Yoshiyuki Tsuji, Small particle motions in super fluid He II: its size effect on particle velocity and acceleration, Quantum Turbulence Workshop, April 10-12, 2017, National High

Magnetic Field Laboratory, Tallahassee, Florida, USA. (招待講演)

[2] Yoshiyuki Tsuji and Yukio Kaneda, Anisotropic Pressure Correlation Spectra in Turbulent Boundary Layer, American Association for the Advancement of Science, June 19-23, 2017, Waimea, Hawai'i Island, USA. (招待講演)

[3] Jiawen Zhang, Takahito Ito, Yoshiyuki Tsuji, Takaya Sato, Takeshi Ooyama, and Kenji Koumura, On the Droplet Deformation due to the Turbulence Interaction in Shear Flow, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, October 27-30, 2017, Okinawa, Japan.

[4] Kyo Yoshida, Yoshiyuki Tsuji, and Hideaki Miura, Spectrum of Turbulence in nonlinear Schrodinger (Gross-Pitaevskii) equation, 5th international Conference on Mathematical Theory of Turbulence via Harmonic Analysis and Computational Fluid Dynamics, March 12-13, 2018, Nagoya University, Japan.

[5] Ali Mehrz, Yoshinobu Yamamoto, and Yoshiyuki Tsuji, Wall Pressure Fluctuation in High-Re-number Channel Flow, 61th workshop on “Investigation and Control of Transition to Turbulence”, September 20-23, 2017, The University of Electro - Communications (UEC), Chofu, Tokyo, Japan.

[6] Yoshiyuki Tsuji, Yoshinobu Yamamoto, and Noriyuki Furuichi, Recent High Re-number Researches of Wall-bounded Turbulence in Japan, Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III, March 19-21, 2018, Nagoya University, Japan.

[7] Ali Mehrez, Yoshinobu Yamamoto and Yoshiyuki Tsuji, High-amplitude wall pressure events and their Relation to turbulent structure in channel flow, 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), Chicago, USA, July, 2017.

[8] Yoshiyuki Tsuji, Large and small-scale interactions in high Reynolds number turbulent boundary layer; comparison with velocity and pressure fluctuations, International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence, June 20 - 22, 2016, at Masukawa Building for Education and Research, Kyoto University.

[9] Wataru Kubo and Yoshiyuki Tsuji, Lagrange trajectory of small particles in super fluid HeII, International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016, 10th – 16th August 2016, Clarion Congress Hotel, Prague, Czech Republic

[10] Akira Hirano, Daiki Kato, Ryouhei Ohtaka, Yoshiyuki Tsuji, Lagrangian property of particle motions in He4 ; comparison with classical turbulence, Interpretation of measurements in superfluid turbulence of He4, Le Centre CEA de Saclay, Saclay, France, September 14-18, 2015.

[11] 吉田 恭, 辻 義之, 三浦英昭, 量子流体のシミュレーションにおけるスペクトル, プラズマシミュレータシンポジウム 2017, 核融合科学研究所, 2017年9月7~8日.

[12] 国立 将真, 久保 涉, 辻 義之, 鈴木 颯, Volker Sonnenschein, 富田 英生, 井口 哲夫, 超流動ヘリウム流動場可視化のためのエキシマ生成に関する研究, 第 49 回日本原子力学会中部支部研究発表会, 2017年12月14~15日, 名古屋市東桜会館, 講演番号 R07.

[13] 松下 琢, 辻 義之他9名, 超流動 4He 中の流れの可視化のための中性子 3He 吸収反応を用いた He2*クラスタの生成 II, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2018年3月22~25日, 23aA28-13.

[14] 吉田 恭, 辻 義之, 三浦英昭, 量子流体乱流の強乱流域におけるスペクトル, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2018年3月22~25日, 26pK601-10.

[15] 辻 義之, 量子乱流中の微細粒子の運動について, 平成 27 年度物性研究所短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」2016年1月5日(火)13:00 ~ 7日(木), 東京大学物性研究所

[16] 辻 義之, 量子渦の可視化と量子乱流中の粒子挙動, 日本物理学会第 71 回年次大会(東北学院大学泉キャンパス), シンポジウム-量子乱流が拓く新しい乱流科学, 20pBR-7, 2016年3月20日.

[17] 久保 涉, 伊藤高啓, 辻 義之, 超流動ヘリウムにおける量子渦を伴う流動場の可視化及び微細粒子の軌道解析, 第 4 4 回可視化情報シンポジウム, 2016年7月19日~7月20日, 工学院大学

[18] 辻 義之, 量子乱流中の渦構造の可視化, 日本流体力学会年会 2016, 2016年9月26日~28日, 名古屋工業大学御器所キャンパス

[19] 大高稜平, 平野 彰, 伊藤高啓, 辻 義之, 超流動乱流場における微小粒子の加速度計測, 日本機械学会東海支部第 64 期総会, 講演論文集 No.153-1, 2015年3月13~14日, 中部大学, 講演番号 155.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 義之 (TSUJI Yoshiyuki)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00252255

(2) 研究分担者

伊藤 高啓 (ITO Takahiro)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00345951